
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

SARMAL SARGILI, GÜNEŞ ENERJİLİ SICAK SU KOLLEKTÖRÜNÜN FARKLI AÇILARDAKİ PERFORMANSININ DENEYSEL VE SAYISAL KARŞILAŞTIRILMASI

Şahin KOLAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞUBAT 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Şahin KOLAY

06/02/2023

SARMAL SARGILI, GÜNEŞ ENERJİLİ SICAK SU KOLLEKTÖRÜNÜN FARKLI AÇILARDAKİ PERFORMANSININ DENEYSEL VE SAYISAL KARŞILAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Şahin KOLAY

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat, 2023

ÖZET

Türkiye coğrafi konumu nedeniyle bir çok yenilenebilir enerji kaynağının verimli kullanılmasına imkan sağladığı gibi yüksek güneş enerjisi potansiyeline ve güneşlenme süresine sahiptir. Bu sebeple birçok bölgede ve farklı sektörlerde güneş enerjisinden çeşitli şekillerde yararlanılmaktadır. Güneş enerjisini kullanan su kollektörleri, sıcak su ihtiyacını karşılamak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada sarmal yapılı bakır borulu ve yüzeyi siyah boyalı kollektör tasarlanmış ve genel performansını belirlemek için farklı koşullarda deney yapılmıştır. Deney sonuçları kayıt altına alınarak akışkan debisinin, güneş ışınlarının geliş açısının ve hava sıcaklıklarının doğrudan etkileri incelenmiştir. Sarmal tip kollektör tasarımıyla güneş ışınlarının günün farklı saatlerinde yüzeye daha uzun süre dik gelmesinin sağlanması ve bu şekilde kollektör soğurma veriminin arttırılması hedeflenmiştir. Sarmal kollektör yapısı bize soğurucu yüzey alanını küçük bir hacimde arttırma imkanını vermiştir. Tasarlanan sarmal yapılı güneş kollektörün similasyonu hazırlanarak teorik sonuçları da elde edilmiştir. Deneysel olarak 3 farklı kollektör eğim açısında ve akışkan olarak su kullanarak farklı debilerde testler yapılmıştır. Deneysel sonuçlara göre yatay, dikey ve açısal konumlarda helisel kollektörün ısıl verimleri sırasıyla ortalama %38.86, %37.1 ve %42.61 aralıklarında elde edilmiştir. Kollektörün yatay, dikey ve açısal konumlarda sürdürülebilirlik indeks değerleri sırasıyla 1.0041-1.0091, 1.0039-1.0087 ve 1.0043-1.0102 aralığında elde edilmiştir. Çalışmada teorik ve deneysel bulgular arasındaki maksimum sapma %16 olarak hesaplanmıştır.

Bilim Kodu : 92807
Anahtar Kelimeler : Güneş Enerjisi, Güneş Işınlarının Geliş Açısı, Debi, Radyasyon,
Sayfa Adedi : 31
Danışman : Doç. Dr. Halil İbrahim VARİYENLİ

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF A HELICALLY-COILED SOLAR WATER COLLECTOR AT VARIOUS ANGULAR PLACEMENTS

(M. Sc. Thesis)

Şahin KOLAY

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February, 2023

ABSTRACT

Solar radiation with water collectors are widely utilized for providing hot water. In the present study, a solar water collector with helically coiled absorber has been designed, prepared testing assembly and experimented at different conditions to determine its overall performance. One of the leading aims of using helically-type collektor is to improve the thermal efficiency of the collector by supplying perpendicular angle or near the this angle between the collektor surface and solar rays from the sun. Also, using helically-coiled structure make it possible to increase absorber surface in a relatively small volume in comparison to conventional solar water collectors. In the next step, the manufactured helically-coiled solar collector has been experimentally tested at three different inclination angles and using for different water flow ratio. According to the testing results, thermal effectiveness of horizontal, vertical and angular helically-coiled collector were obtained in the ranges of 38.86%, 37.1% and 42.61%, respectively. In addition, helically collektor sustainability index values were achieved for horizontal 1.0041-1.0091, vertical 1.0039-1.0087 and angular 1.0043-1.0102, were achieved. End of the experiment, maximum difference between numerical analysys and experimental conclusionss was calculated as 16%.

Science Code : 92807
Key Words : Solar Radiation, Flow rate, Helically-Coiled Collector
Page Number : 31
Supervisor : Assist. Prof. Dr. Halil İbrahim VARİYENLİ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez sürecimde bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım bana her konuda destek olup anlayış gösteren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Halil İbrahim VARİYENLİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Tüm yaşamımda olduğu gibi bu çalışmamda da fikirleri ve bana tanımış oldukları sınırsız fırsatlarla yanımda olan başta eşim, ailem ve arkadaşlarıma aslında altında benim adımın yazılı olduğu ancak onların teşvik ve destekleriyle elde etmiş olduğum başarılardan ötürü teşekkür etmeyi borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ viii

ŞEKİLLERİN LİSTESİ ix

RESİMLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xi

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR TARAMASI 3

3. ANALİTİK METOT 5

3.1. Akış ve Isı Analizi 5

3.1.1. Analitik geometri 5

3.1.2. Mesh yapısı 5

3.1.3. Sınır şartları 7

3.1.4. Analiz 8

4. MATERYAL METOT 11

4.1. Deney Setinin Kurulumu 11

4.2. Deneysel Prosedür 12

4.3. Teorik Hesaplamalar 13

5. SİMİLASYON VE DENEYSEL VERİLER 15

5.1. Similasyon Verileri 15

5.2. Deneysel Veriler 17

6. SONUÇ VE ÖNERİLER 25

KAYNAKLAR 27

ÖZGEÇMİŞ 31

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1**.** Analiz ağ yapısı bağımsızlığı …… 7

Çizelge 3.2. İki farklı giriş kütle değeri için çözelti artıkları 8

Çizelge 5.1. Elde edilen ısıl verim değerlerinin literatürde bulunan benzer çalışmalarla karşılaştırılması 24

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Mevcut çalışmanın genel yapısı..... 4
Şekil 3.1. Analitik geometri 5
Şekil 3.2. Analiz ağ yapısının kesit görünüş(a)tüm bölgeler (b) su ve tüp şeması 6
Şekil 3.3. Tüm etki alanı ağ yapısının istatistik verileri 7
Şekil 4.1. (a)Deney düzeneğinin şematik görünüşü (b) incelenen eğim açıları..... 11
Şekil 5.1. Su alanının basınç dağılımı (Su akış hızı 1,5 l/dk) 15
Şekil 5.2. Su bölgesinin hız dağılımı (Su akış hızı 1,5 l/dk)..... 15
Şekil 5.3. Kollektörün sarmal üzerindeki güneş ısısı akısı (a) θ=0 (b) θ=40 (c) θ=90.. 16
Şekil 5.4. Sayısal olarak elde edilen basınç düşüşü değerleri..... 17
Şekil 5.5. Ölçülen solar radyasyon değerlerinde zamana bağlı değişim..... 18
Şekil 5.6. Ortam sıcaklık değerlerinde zamana bağlı değişim..... 19
Şekil 5.7. Giriş suyu sıcaklıklarında zamana bağlı değişim 19
Şekil 5.8. Çıkış suyu sıcaklıklarında ve kazanılan ısıda zamana bağlı değişim 21
Şekil 5.9. Isıl verim değerlerinde zamana bağlı değişim 22
Şekil 5.10. Zamana bağlı değişim ekserji verimliliği değerleri 23
Şekil 5.11. Deneysel olarak elde edilen ortalama SI değerleri 23
Şekil 5.12. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen kazanılmış ısıl enerji değerlerinin karşılaştırılması..... 24

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 4.1. Deney seti fotoğrafı 12

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
A	Kollektör Yüzey Alanı (m^2)
$\boldsymbol{C_p}$	Özgül Isınma Isısı (kJ/kg°C)
°C	Derece (Selsius)
$\boldsymbol{D_h}$	Hidrolik Çap (m)
$\boldsymbol{\dot{E}_X}$	Ekserji oranı (W)
$\boldsymbol{h}$	Isı transfer katsayısı (W/m^{2}K)
I	Güneş Işınım Şiddeti (W/m^2)
$\boldsymbol{k}$	Termal İletkenlik (W/m.K)
$\boldsymbol{\dot{m}}$	Birim Zamandaki Kütle (kg/s)
$\boldsymbol{Nu}$	Nusselt sayısı
η	Verim (%)
η_t	Termal Verim (%)
η_e	Ekserji Verimi (%)
$\boldsymbol{u_i}$	Hız (m/s)
$\boldsymbol{\mu_w}$	Dinamik viskozite (Pa.s)
$\boldsymbol{T_g}$	Deneye Ait Giriş Su Sıcaklığı (°C)
$\boldsymbol{T_ç}$	Deneye Ait Çıkış Su Sıcaklığı (°C)
TRA	Kollektör Üzerine Düşen Enerji (W)
$\boldsymbol{Re}$	Reynolds sayısı
$\boldsymbol{SI}$	Sürdürülebilirlik endeksi
$\boldsymbol{Q_s}$	Sistemden Sağlanan Enerji (W)
$\boldsymbol{w_1, w_2 \ldots w_n}$	Bağımsız Değişkenlerdeki Belirsizlik
$\boldsymbol{W_R}$	Toplam Belirsizlik (%)
$\boldsymbol{\rho_w}$	Suyun Özkütlesi (W/m^3)

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
dk	Dakika
l	Litre
m	Kütle

1. GİRİŞ

Günümüzde küresel enerji talebinin büyük bir bölümü fosil kaynaklardan karşılanmakta ve gelişen endüstriler dünyanın enerji talebinde büyük bir artışa neden olmaktadır. Fosil yakıt kaynakları sınırlıdır ve gelecek için alternatif enerji kaynaklarının bulunması gerekmektedir. Ayrıca fosil yakıt kullanımının dikkate alınması gereken önemli olumsuz çevresel etkileri vardır [1]. Fosil yakıtlara alternatif denildiği zaman akla ilk gelen yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Birçok yenilenebilir enerji kaynağı olmasına rağmen güneş enerjisi yenilenebilir enerji kaynakları arasında ilk sırada yer alır ve bir çok alanda farklı şekillerde kullanılır. Güneş enerjisinin hem kullanımın hiçbir tehlike arz etmemesi hemde kolay ulaşılabilir olması da önemli bir etkendir. Güneşten gelen güneş radyasyonu, fotovoltaik paneller veya güneş havası ve su kollektröleri gibi termal sistemler kullanılarak faydalı enerjiye dönüştürülebilir [2-4].

Güneş enerjisi kollektörleri, yüksek ısıl verimleri ve düşük maliyetleri nedeniyle sıcak hava ve su sağlamak için farklı uygulamalarda kullanılmaktadır. Son yıllarda, sıcak su temini için düz plaka ve vakumlu boru kollektörleri gibi farklı tip güneş enerjili su kollektörleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir çalışmasında Pathak ve ark.(2019) aynı anda sıcak hava ve sıcak su sağlamak için çift amaçlı bir kollektör geliştirdi [5]. Çeşitli tipteki güneş kollektörlerinin termal performansını yükseltmek için farklı teknikler uygulandı [6,7]. Ayrıca bazı araştırmacılar güneş enerjisi sistemlerinin ullanım süresini uzatmak için faz değiştiren maddelerden de faydalanmışlardır [8-10]. Nanoakışkanlar, güneş kollektörlerinde ısıl verimi arttırmak için çalışma sıvısı olarak kullanılabilir [11].

Yapılan tez çalışmasında deney seti olarak sarmal yapıda bir güneş kollektörü tasarımı yapıldı. Kollektörde bakır boru kullanılarak sarmal yapı oluşturulmuş üzeri yüksek emiciliğe sahip mat siyah renkte endüstriyel boya ile boyandı. Kollektör kasası 4mm cam kullanılarak dış etkilere karşı muhafaza edildi. Kollektör zeminine yansıtıcı özelleği sebebiyle reflektör kaplandı. Hazırlanan deney seti 3 farklı akışkan debisinde ve 3 farklı kollektör açısında test yapılarak elde edilen verilen kaydedilerek analitik ve materyal metot kullanılarak kıyaslama yapıldı. Güneş radyasyon değeri hava sıcaklığı ve ortam sıcaklığı her deney günü 15’er dakikalık zaman aralıklarında

kaydedilerek etkileri gözlemlendi. Deneyler yapılırken dış ortamın etkilerini en aza indirmek için birbirini takip eden günler veya sıcaklık rüzgar şartları arandı.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde önceki çalışmalarda kullanılan güneş enerjisi kollektör tipleri, uygulama metodları ve kullanılan akışkanlar hakkında literatür taraması yapıldı.

Almeshaal ve diğerleri (2020), bir güneş enerjili su kollektörünün termal performansını arttırmak için bükülmüş bant türbülatörleri kullandı [12]. Gholipour ve diğerleri (2020), vakumlu tüp kollektörlerin verimliliğini arttırmak için yeni emici tüp tasarladı ve üretti [13]. Başka ve çalışmada Ghalipour ve diğerleri (2021), yeni tip vakumlu U-Tüplü güneş kollektörü kullandı ve nanoakışkan kullanarak verimliliklerini arttırdı [14]. Son yıllarda çeşitli uygulamalarda kullanılmak üzere farklı tiplerde borulu güneş kollektörleri geliştirilmiştir [15]. Bazı araştırmacılar tüp tipi soğurucu kullanmanın, soğurucu yüzeyi ile güneş ışınları arasında dik açı sağlayarak toplayıcının ısıl veriminin yükseltilebileceğini belirtmişlerdir [16,17].

Geleneksel güneş kollektörlerinden farklı olarak, Goudarzi ve diğerleri(2014), sarmal olarak sarılmış bir güneş kollektörü üretti, su ve CuO-su nanoakışkanı ile test etti [18].Başka bir çalışmada Goudarzi ve diğerleri (2015), iki farklı nanoakışkan kullanarak yatay olarak konumlandırılmış sarmal sargılı bir güneş kollektörünün performansını deneysel olarak inceledi [19].

Shojaeizadeh ve diğerleri (2021), sarmal olarak sarılmış bir güneş enerjili su ısıtıcısı geliştirdi ve manyetik alan altında nanoakışkan kullanarak verimliliğini arttırdı [20].

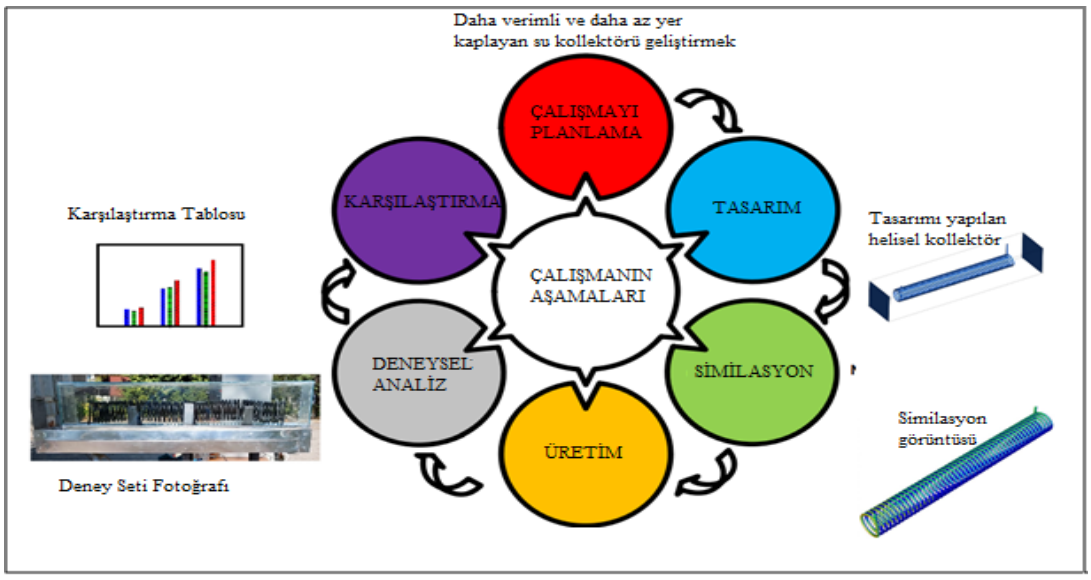
Chakraborty ve diğerleri, ısıl verimi artırmak için parabolik bir güneş oluğu kollektörü için sayısal olarak sarmal bir soğurucu boru tasarladı [21]. Swanepoel ve diğerleri, konsantre tip bir toplayıcıda doğrudan buhar üretimi için yeni bir sarmal sarmal kollektör tasarladı [22]. Raut ve diğerleri, parafin malzeme ile doldurulmuş bir kabuğun içine yerleştirilmiş helisel olarak sarılmış tüp kullanarak güneş enerjisi depolama potansiyelini araştırdı [23].

Bazı araştırmacılar, güneş kollektörleri ve kurutma sistemleri gibi çeşitli enerji sistemlerinin termal ve akış davranışını araştırmak için farklı sayısal yöntemler uygulamışlardır [24,25]. Singla ve diğerleri, sıcak hava üretimi için nervürlü

pürüzlendirilmiş boşaltılmış tüp tipi güneş kollektörünün termal ve akış davranışını araştırmak için CFD yaklaşımını kullandı [26].

Sheikholeslami ve diğerleri hibrit tip nanoakışkanlar kullanarak farklı türbülatörler içeren bir güneş kollektörünün ısı transferini iyileştirme potansiyelini sayısal olarak analiz etti [27]. Başka bir çalışmada, Sheikholeslami ve diğerleri, türbülanslı akış rejiminde bir güneş enerjili su toplayıcısındaki nanoakışkanın termal davranışını modellemek için Ansys Fluent yazılımını kullandı [28]. Saedodin ve diğerleri, bir parabolik oluklu toplayıcının tüpü üzerine farklı tipte türbülatör eklemenin sistemin genel performansı üzerindeki etkisini sayısal olarak araştırdı [29]. Awasthi ve Khan, yoğunlaştırıcı bir toplayıcı için sarmal tüp tipi bir alıcının genel performansını simüle etmek için Fluent yazılımını kullandı [30]. Xiong ve diğerleri, hibrit tip nanoakışkanlar kullanan düz plakalı bir toplayıcının termal davranışını sayısal olarak modelledi [31].

Literatürdeki mevcut çalışmaların incelenmesi, tüp tipi soğurucuların farklı güneş kollektörlerindeki potansiyelini göstermektedir. Ayrıca, bazı uygulamalarda yüzey alanını artırmak ve ısıl verimi iyileştirmek için sarmal sargılı soğurucular kullanılmıştır. Mevcut çalışmada, sarmal soğuruculu bir güneş enerjili su kollektörü tasarlanıp üretildi ve genel performansını belirlemek için farklı koşullarda test edildi. Geliştirilen sarmal sargılı güneş kollektörü, yönlendirme etkisini belirlemek için üç farklı eğim açısında test edildi. Bu çalışmanın genel yapısı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Mevcut çalışmanın genel yapısı

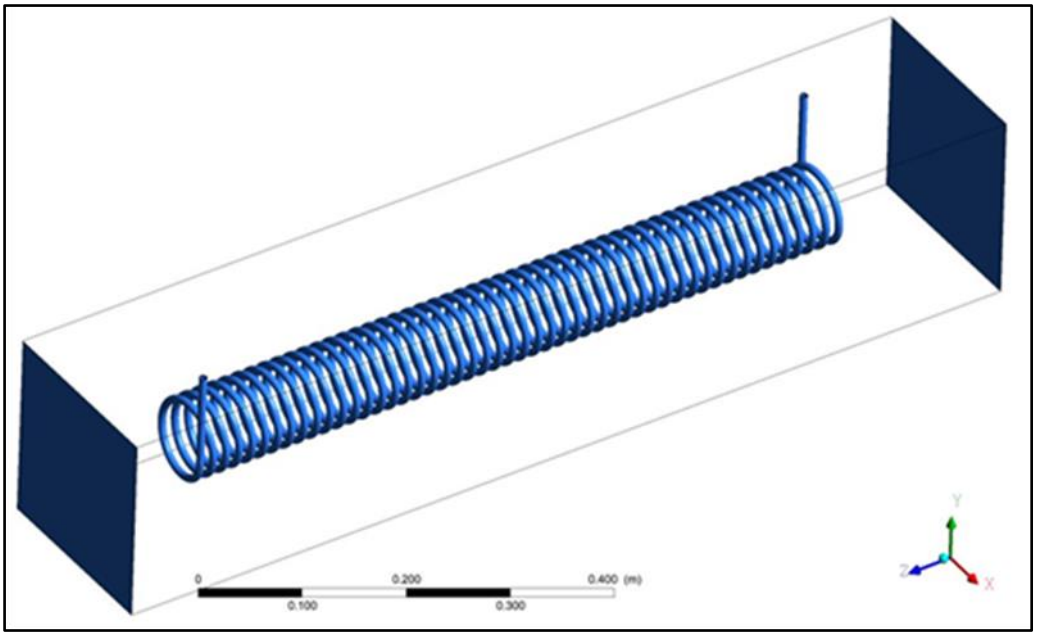
3. ANALİTİK METOT

Bu başlık altında yapılan analitik metotlar ve sınır şartlarından kullanılan programlardan ve yararlanılan denklemler açıkça ifade edilmiştir.

3.1. Akış ve Isı Analizi

3.1.1. Analitik geometri

Ansys Workbench yazılımı, spiral kanal içindeki su akışını ve güneş ısısı emilimini analiz etmek için kullanıldı. CAD geometrisi, Ansys Workbench'in Design Modeler modülünde oluşturuldu (Şekil 3.1). Tasarlanan güneş kollektörü geometrisinde su, bakır boru, hava odası ve izolasyon cam duvar alanları oluşturuldu.

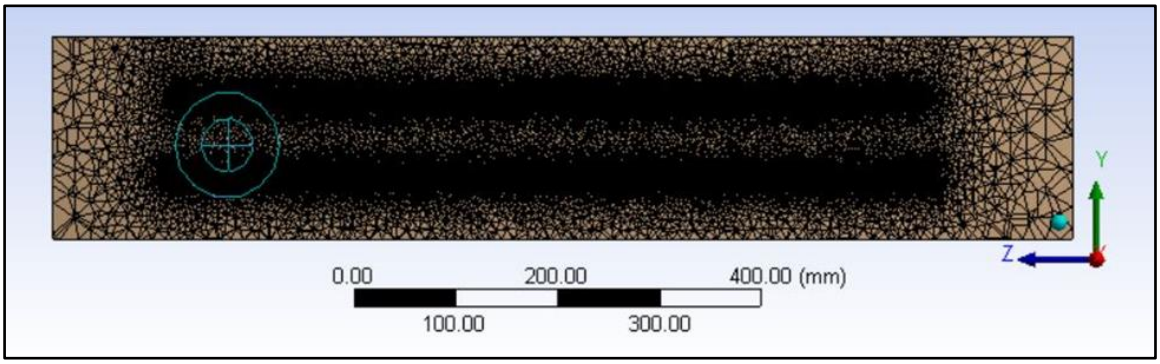


Şekil 3.1. Analitik geometri

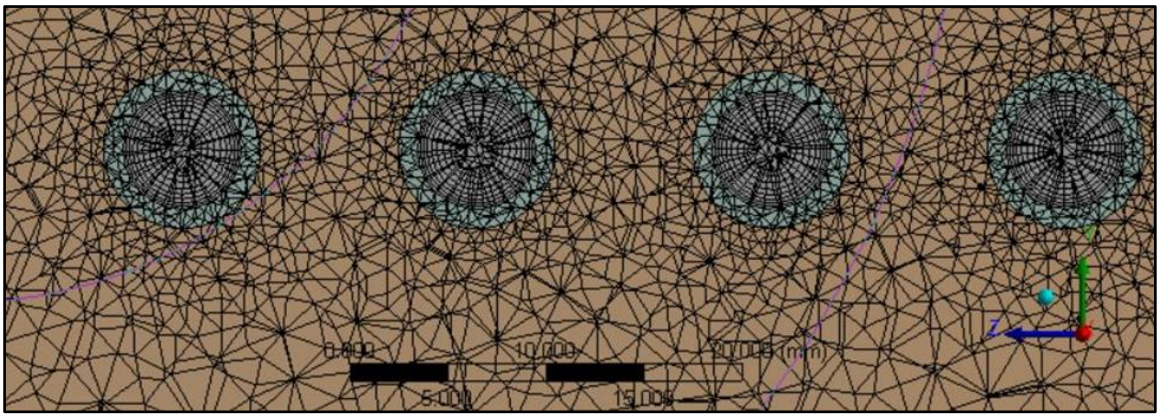
3.1.2. Mesh yapısı

Modelin analiz ağ yapısı Ansys/Mesh modülünde yapıldı. Duvarların ve kenarların yakınında arıtma ve yüzey boyutlandırma ile su bölgesi için 0,8 mm eleman boyutu seçildi (Şekil 3.2a). Hava ve kollektörün temas bölgesi güneş enerjisinin soğurulmasında kritik olduğundan, bu alanın mesh oluşturma işlemi daha ince bir eleman boyutuyla yapıldı.

Ağ kalitesi için bir kriter vermek üzere, mesh yapılarının eğiklik sayısı değerlendirildi. (Şekil 3.3), tüm alan mesh yapısı istatistik verilerini sunmaktadır. Çarpıklık sayısının ortalama ve maksimum değerleri sırasıyla 0,28 ve 0,93'tür. Akış analizi için çarpıklık sayısının kabul edilen maksimum değeri 0,98'dir. Sunulan mesh yapısının iyi bir kaliteye sahip olduğu sonucuna varılabilir. Tüm mesh yapısı yaklaşık 6.195.000 Düğüm ve 24.586.000 Öğeye sahiptir.

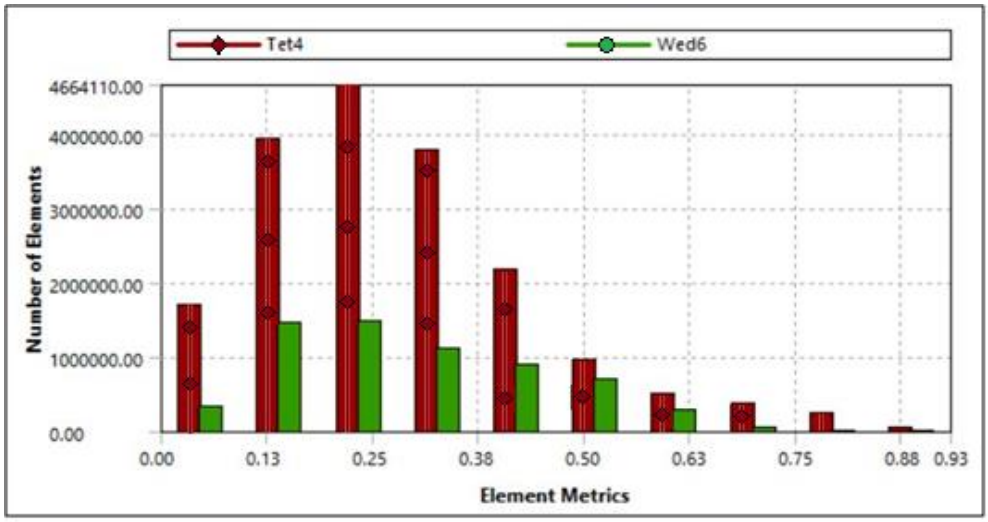


(a)



(b)

Şekil 3.2. Analiz ağ yapısının kesit görünüşü (a) tüm bölgeler, (b) su ve tüp şeması



Şekil 3.3. Tüm etki alanı ağ yapısının istatistik verileri

Analizin mesh bağımsızlığını incelemek için, su alanı için 3 farklı hücre boyutu seçildi ve spiral boru içindeki basınç düşüşünü hesaplamak için bir akış analizi yapıldı (Tablo 3.1.). Bu vaka çalışması için akış hızı 1,5 l/dk belirlendi.

Çizelge 3.1**.** Analiz ağ yapısı bağımsızlığı

	Mesh1	Mesh2	Mesh3
Eleman Adeti	5,900,000	7,100,000	8,550,000
Eleman Farkı (%)	-	25	25
Basınç Düşümü (kPa)	45	55	58.67
Basınç Farkı (%)	-	22.2	6.6

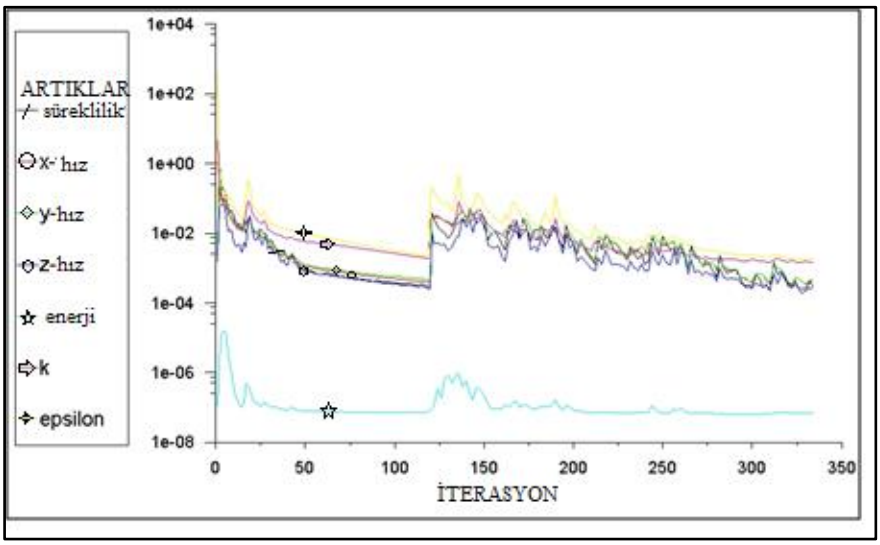
3.1.3. Sınır şartları

Alanın sınır koşulları, su giriş kütlesi, güneş radyasyonu ve konveksiyon ısı kaybından oluşur. Sarmal sargılı güneş kollektörünün sayısal analizinde 3 farklı su kütlesi akışı incelendi (1.5, 1 ve 0.5 l/dk). Şeffaf cam duvarlarda tanımlanmış güneş yönü vektörü ile güneş ışınımı kullanıldı. Kollektörün alt tarafı da 0.1 soğurma ve 0.8 geçirgenlik güneş sınır koşulları ile 4 mm kalınlığında cam duvarlarla kaplandı. Kollektör çevresi 20°C sıcaklıkta ve konveksiyon ısı transfer katsayısı 5 (W/m2.K) olan ortam olarak tanımlandı.

3.1.4. Analiz

Ansys/Fluent modülünde sarmal sargılı güneş kollektörünün akış ve termal analizi yapıldı. Kararlı durum, k-ε türbülanslı model ile basınca dayalı akış seçildir. Çalışma akışkanı olarak standart hava ve su sıvısı seçildi. Kolektöre güneş ışınımı uygulamak için, yüzeyden yüzeye model etkinleştirilerek Fluent'in radyasyon modeli araç kutusu kullanıldı. Cihazın açısal konumuna göre güneş yönü vektörü tanımlandı. Kesin bir çözüme sahip olmak için sürdürülebilirlik endeksi, x-y ve z-hızları için yakınsama mutlak kriteri 1e-3 olarak tanımlandı. Şekil 3.1, çözümün artıklarını göstermektedir.

Çizelge 3.2. İki farklı giriş kütle değeri için çözelti artıkları



Akışkan alanında süreklilik ve momentum denklemleri çözülerek her bir hücredeki hız (u, v ve w) ve basınç (P) değerleri hesaplanır. Sabit yoğunluk (ρ) koşulları için süreklilik denklemi şu şekilde ifade edilebilir [32].

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \qquad (1)$$

Üç eksendeki (x, y ve z) momentum denklemleri eş zamanlı olarak çözüldü. Örnek olarak, x momentum denklemi aşağıdaki formda sunulabilir:

$$\rho\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right)=\rho g_x-\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(2\mu\frac{\partial u}{\partial x}+\lambda\vec{\nabla}.\vec{V}\right)+$$

$$\frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\mu(\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial z})\right] \quad (2)$$

Standart denklemlerde kullanılan k-ε modeli (SKE), endüstriyel uygulamalar için en yaygın kullanılan akışkan türbülans modelidir [33,34]. Model parametreleri, boru akışı gibi bir dizi kıyaslama deneyinden elde edilen veriler kullanılarak kalibre edilir. Çok çeşitli uygulamalar için sağlam ve makul ölçüde doğrudur. Türbülans enerjisi k'nin kendi taşıma denklemi vardır [35].

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\bar{u}_i k)}{\partial X_i}=-\rho\overline{\acute{u}_\iota\acute{u}_J}\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial t}-\rho\varepsilon+\frac{\partial}{\partial X_i}\left[(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k})\frac{\partial k}{\partial X_i}\right] \quad (3)$$

Bu, aşağıdaki gibi tamamen fenomenolojik olarak modellenen (türetilmemiş) bir dağılım oranı ε gerektirir:

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\bar{u}_i\varepsilon)}{\partial X_i}=C_{1\varepsilon}P_k\frac{\varepsilon}{k}-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+\frac{\partial}{\partial X_j}\left[(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon})\frac{\partial\varepsilon}{\partial X_j}\right] \quad (4)$$

Boyutsal olarak, dağılma oranı (ε) k ve bir türbülans uzunluk ölçeği (L_t) ile ilişkilidir

$$\varepsilon=\frac{k^{3/2}}{L_t} \quad (5)$$

k denklemi ile birlikte girdap viskozitesi (μ_t) şu şekilde ifade edilebilir:

$$\mu_t=\rho C_\mu L_t\sqrt{k}=\rho C_\mu\frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

Enerji denklemi, alandaki sıcaklık (T) dağılımını elde etmek için sıvı alanında çözülür.

$$\rho c_p\left(u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}+w\frac{\partial T}{\partial z}\right)=\vec{\nabla}.k\,\vec{V}\,T+\ \varphi \quad (7)$$

φ, enerji kaynağı ve c_p çözüm alanındaki malzemelerin özgül ısı kapasitesidir. Spiral tüp yüzeyleri ve cam duvar yüzeyleri güneş ışınımının bir kısmını emebilir. Alanın radyasyon analizi, ya her bir yüzeyin sıcaklığı aşağıdaki denklemlere göre hesaplanır [36].

$$\dot{Q}_\iota = A_i \sum_{j=1}^{N} F_{i\to j}(J_i - J_j) \quad (8)$$

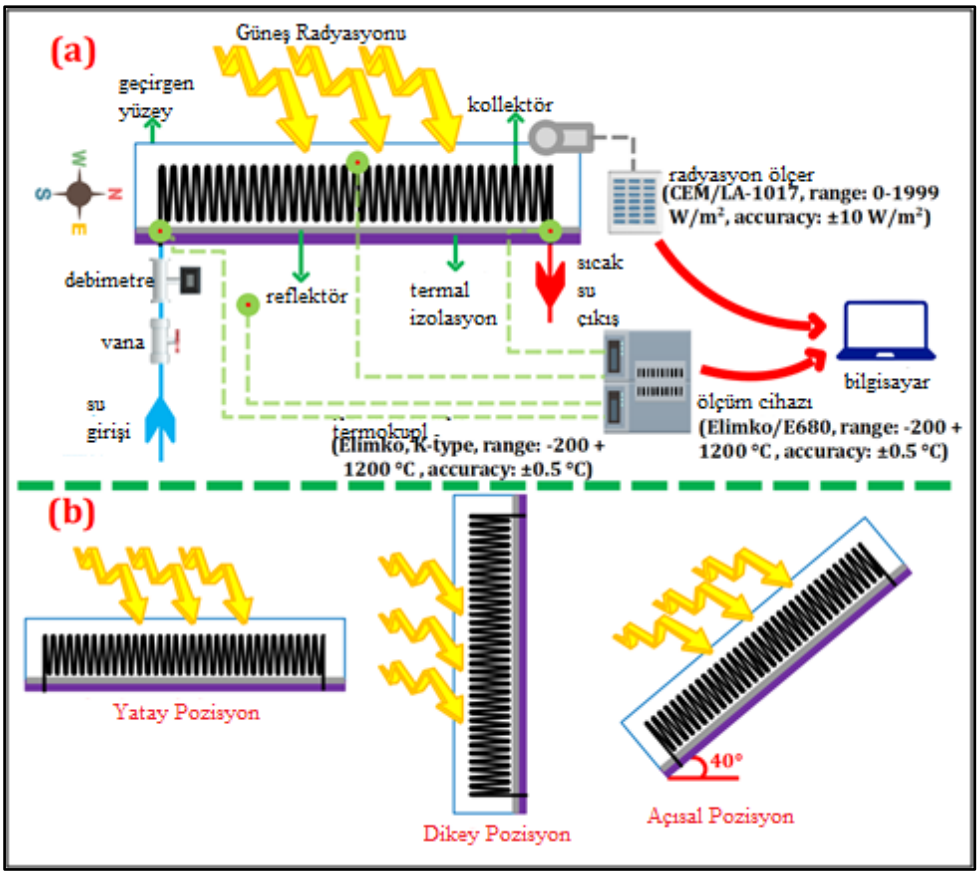
$$\sigma T_i^4 = J_i + \frac{1-\epsilon_i}{\epsilon_i} \sum_{j=1}^{N} F_{i\to j}(J_i - J_j) \quad (9)$$

$F_{i\to j}$'nin görüş faktörü, i yüzeyinden ayrılan radyasyonun j yüzeyine çarpan kısmını temsil eder. Bir yüzeyden birim zamanda ve birim alandan ayrılan toplam radyasyon enerjisi radyozitedir ve J değeri ile gösterilir. N, etki alanındaki yüzeylerin sayısıdır. $F_{i\to j}$'nin görüş faktörü, i yüzeyinden ayrılan radyasyonun j yüzeyine çarpan kısmını temsil eder. Bir yüzeyden birim zamanda ve birim alandan ayrılan toplam radyasyon enerjisi radyozitedir ve J değeri ile gösterilir. N, etki alanındaki yüzeylerin sayısıdır.

4. MATERYAL METOT

4.1. Deney Setinin Kurulumu

Bu araştırmada, yeni geliştirilen sarmal sargılı bir güneş kollektörü geliştirilmiş, üretilmiş ve analiz edilmiştir. Bu bağlamda, güneş kollektöründe kullanılmak üzere sarmal sargılı boru geliştirmek için bakır boru kullanılmıştır. Kullanılan bakır borunun çapı 8 mm'dir. Ayrıca geliştirilen sarmal kollektör 85 mm çapındadır. Ayrıca bobin hatvesi ve toplam bobin dönüş sayısı değerleri sırasıyla 15 mm ve 49 adettir.



Şekil 4.1. Deney düzeneğinin şematik görünüşü ve incelenen eğim açıları

Tüp tipi soğurucu kullanmanın ana hedeflerinden biri, soğurucu yüzeyi ile gelen güneş ışınları arasında dik açı sağlayarak toplayıcının ısıl verimini yükseltmektir. Ayrıca sarmal yapı kullanılması, geleneksel (düz plaka) güneş enerjisi kollektörlerine kıyasla nispeten küçük bir hacimde soğurucu yüzeyi arttırmayı mümkün kılar. Yapılmış olan sarmal kollektör %95 emiciliğe sahip endüstriyel mat siyah boya ile boyanmıştır. Kolektörün kasa malzemesi olarak 4 mm kalınlığında ve %92 geçirgenliğe sahip cam dikdörtgen prizma

kullanılmıştır. Güneş ışınlarını helisel olarak sarılmış soğurucu tüpün alt tarafına yansıtmak için kasanın alt kısmında reflektör plaka kullanılmıştır. Ayrıca kollektörün arka tarafından ısı kayıplarını önlemek için kollektör alt tarafı ısıl olarak yalıtılmıştır. Şekil 6, deney düzeneğinin şematik bir görünümünü ve incelenen eğim açılarının görünümünü temsil eder. Ek olarak, Resim 1, kullanılan deney düzeneğinin bir fotoğrafını göstermektedir.



Resim 4.1. Deney seti fotoğrafı

4.2. Deneysel Prosedür

Tasarlanan ve üretilen sarmal sargılı güneş enerjili su kollektörü, Eylül ve Ekim 2021'de Ankara, Türkiye'de test edilmiştir. Yukarıda belirtildiği gibi, bu çalışmada eğim açısının ve su kütle akış hızının etkileri incelenmiştir. Buna göre, geliştirilen sarmal sargılı güneş enerjili su kollektörü, eğim açısının enerjik ve ekserjetik performanslar üzerindeki etkisini belirlemek için üç farklı eğim açısında test edilmiştir. Sırasıyla güneş enerjili su kollektörünün yatay, dikey ve açısal yönlenmesinde yapılmıştır. Güneş enerjili su kollektörünün açısal yerleşiminde test bölgesinin yıllık eğim açısına karşılık gelen 40° eğim açısı seçilmiştir. Kollektörün farklı duruş pozisyonlarında akışkan debisi 1,5, 1,0 ve 0,5 l/dk olmak üzere deneyler tekrar edilmiştir. Yani deneyler 9 günde yapılmıştır. Şebeke suyu ile beslenen helisel sargılı kollektör üzeri örtülerek performans deneylerine

başlanmadan önce güneye doğru yönlendirilmiştir. Daha sonra giriş suyunun debisi debimetre ile ayarlanarak kollektöre su girişi yapılmıştır. Testlere başlamadan önce kapalı kollektörde 15 dakika su sirkülasyonu yapılarak sistemde kararlı rejim elde edilmeye çalışılmıştır. Kollektörün kapağı üzeri açılarak ve deneylere saat 10:00'da başlanmış ve saat 16:00'da sonlandırılmıştır. Kollektör girişinde, kollektör çıkışında, helisel sargılı yüzeyde ve ortam sıcaklık değerleri kaydedilmiştir. Buna 15 dakikada bir sıcaklık ölçümleri kaydedilmiştir. Ölçüm noktaları Şekil 4.1'de görülebilir.

4.3. Teorik Hesaplamalar

Bu araştırmada, tasarlanan ve üretilen sarmal sargılı su toplayıcı, enerji ve ekserji analizleri kullanılarak incelenmiştir. Bilindiği üzere boyutsuz sayılar termal sistemlerin analizinde sıklıkla kullanılmaktadır. Reynolds ve Nusselt sayıları Denklemler kullanılarak hesaplanabilir [37].

$$Re = \frac{\rho_w u_i D_h}{\mu_w} \tag{10}$$

$$Nu = \frac{hD_h}{k_w} \tag{11}$$

Kollektör tarafından kazanılan faydalı enerji şu şekilde hesaplanabilir:

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \left(T_{w,o} - T_{w,i}\right) \tag{12}$$

Güneş kollektörünün termal verimliliği, genel performansın değerlendirilmesinde önemli bir parametredir ve şu şekilde elde edilebilir:

$$\eta_t = \frac{\dot{Q}}{IA} \tag{13}$$

Ekserji ifadesi, termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarının bir kombinasyonudur. Ekserji analizi genellikle ısıl sistemlerin tasarım adımlarında kullanılır. Ekserjinin genel ifadesi şu şekilde verilebilir [31,38].

$$\sum \dot{E}x_{i,net} - \sum \dot{E}x_{o,net} = \sum \dot{E}x_{loss} \quad (14)$$

Ekserji verimliliği aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir [39].

$$\eta_e = \frac{\sum \dot{E}x_{o,net}}{\sum \dot{E}x_{i,net}} = 1 - \frac{\sum \dot{E}x_{loss}}{\sum \dot{E}x_{i,net}} \quad (15)$$

Güneş enerjili su kollektörünün net giriş ekserjisi Denklem (1) kullanılarak elde edilebilir [40].

$$\sum \dot{E}x_{i,net} = IA\left[1 - \frac{4}{3}\left(\frac{T_a}{T_s}\right) + \frac{1}{3}\left(\frac{T_a}{T_s}\right)^4\right] \quad (16)$$

Ayrıca güneş enerjili su toplayıcısının net çıkış ekserjisi şu şekilde hesaplanabilir [41,42].

$$\sum \dot{E}x_{o,net} = \dot{Q}\left(1 - \frac{T_a}{T_{w,o}}\right) \quad (17)$$

Sürdürülebilirlik indeksi, Denklem kullanılarak hesaplanabilen başka bir ekserjiye dayalı faktördür [43].

$$SI = \frac{1}{1-\eta_e} \quad (18)$$

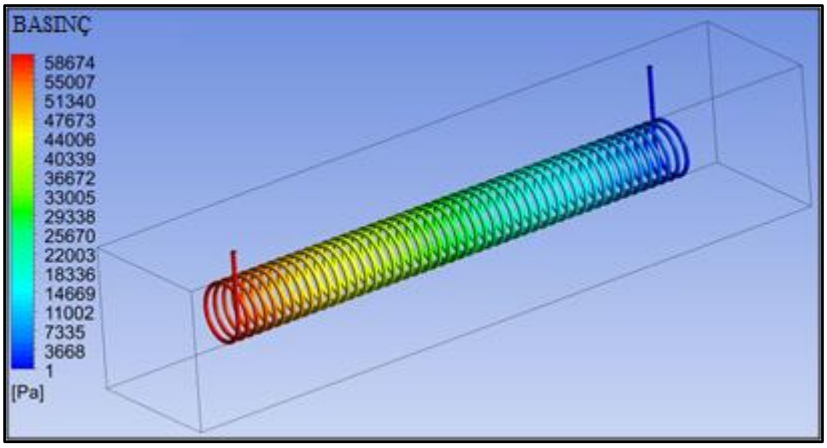
Deneysel belirsizlik, deneysel sonuçların değerlendirilmesinde de önemli bir göstergedir ve şu şekilde elde edilebilir:

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n\right)^2\right]^{1/2} \quad (19)$$

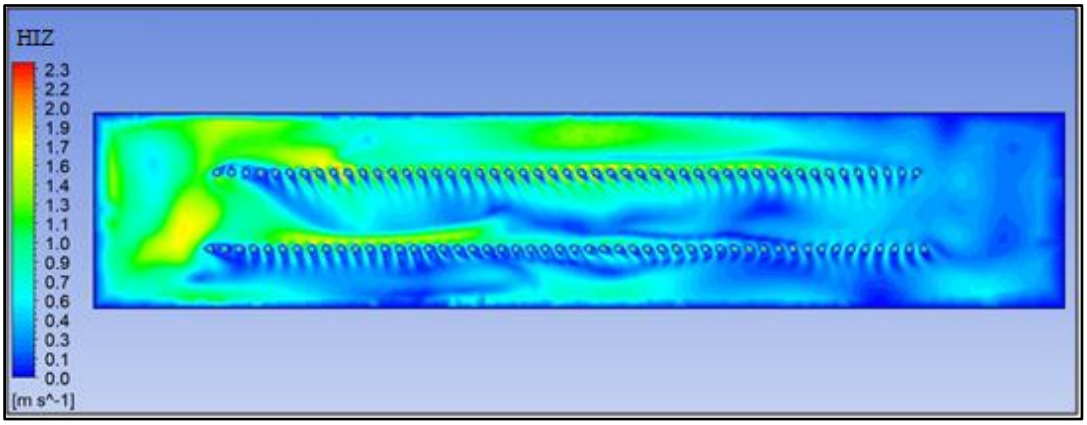
5. SİMİLASYON VE DENEYSEL VERİLER

5.1. Similasyon Verileri

Geliştirilen sarmal sargılı kollektörün sayısal analizi, sistemin çeşitli koşullarda genel performansını göstermek için farklı akış hızlarında ve yönlendirme açılarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.1, kütle akış hızı 1,5 l/dk olduğunda su alanındaki basınç düşüşünü göstermektedir. Su borusunun çıkış basıncı sıfır bağıl basınçtır. Bu durumda maksimum basınç farkı 58,7 kPa'dır. Şekil 5.2, hem su hem de hava alanındaki hız dağılımını göstermektedir. Kollektörün hava alanı maksimum hız değerlerine sahiptir çünkü sıcaklık farkı bu alanda doğal bir konveksiyon girdap hareketine neden olur. Kollektörün su alanı, 1,5 (l/dk) kütlesel debi durumunda ortalama 0,88 (m/s) hız değerine sahiptir.

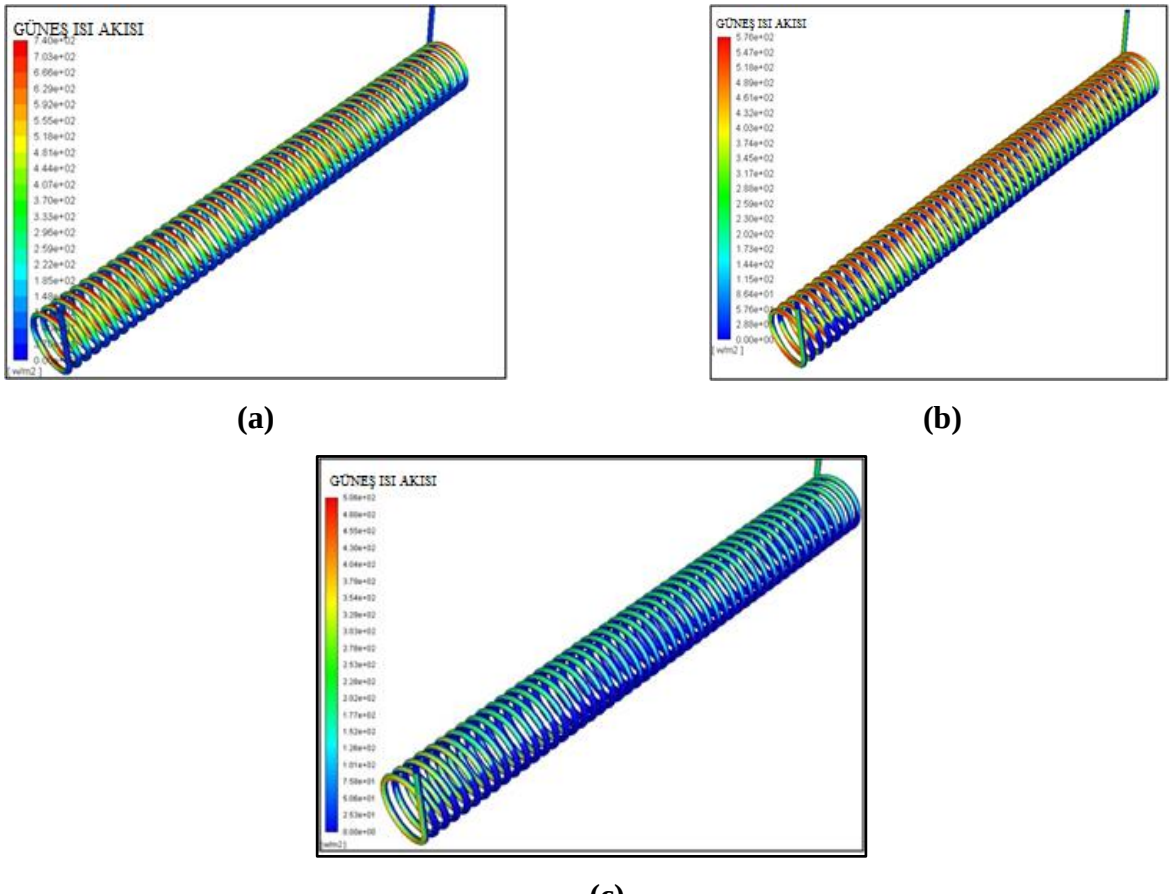


Şekil 5.1. Su alanının basınç dağılımı (Su akış hızı 1,5 l/dk)



Şekil 5.2. Su bölgesinin hız dağılımı (Su akış hızı 1,5 l/dk)

Bu çalışmada, literatürde yaygın olarak kullanılan sabit ısı akısı yerine helisel sargılı güneş kollektörü simülasyonu için güneş radyasyonu modeli uygulanmıştır. Isı akısı uygulamak, güneş enerjisi tabanlı sistemleri modellemek için bir yaklaşımdır. Bununla birlikte, güneş radyasyonu modelinin uygulanması, deneysel bulgulara benzer sonuçlar verebilir. Şekil 5.3, güneş kollektörünün helisel olarak sarılmış tüpü üzerindeki güneş ısısı akışını üç farklı deney açısında göstermektedir. Güneş kollektörünün üç yönü arasındaki fark, Şekil 5.3'de açıkça görülmektedir. Diğer bir deyişle, bu şekil, helisel olarak sarılmış güneş enerjisi su toplayıcısının yönünün etkisini temsil etmektedir. Sarmal sarımlı tüp üzerindeki güneş ısısı akı dağılımının değerlendirilmesi, diğer yerleşimlere kıyasla güneş enerjisi elde etmede kollektörün açısal yerleşiminin yüksek potansiyelini göstermektedir.

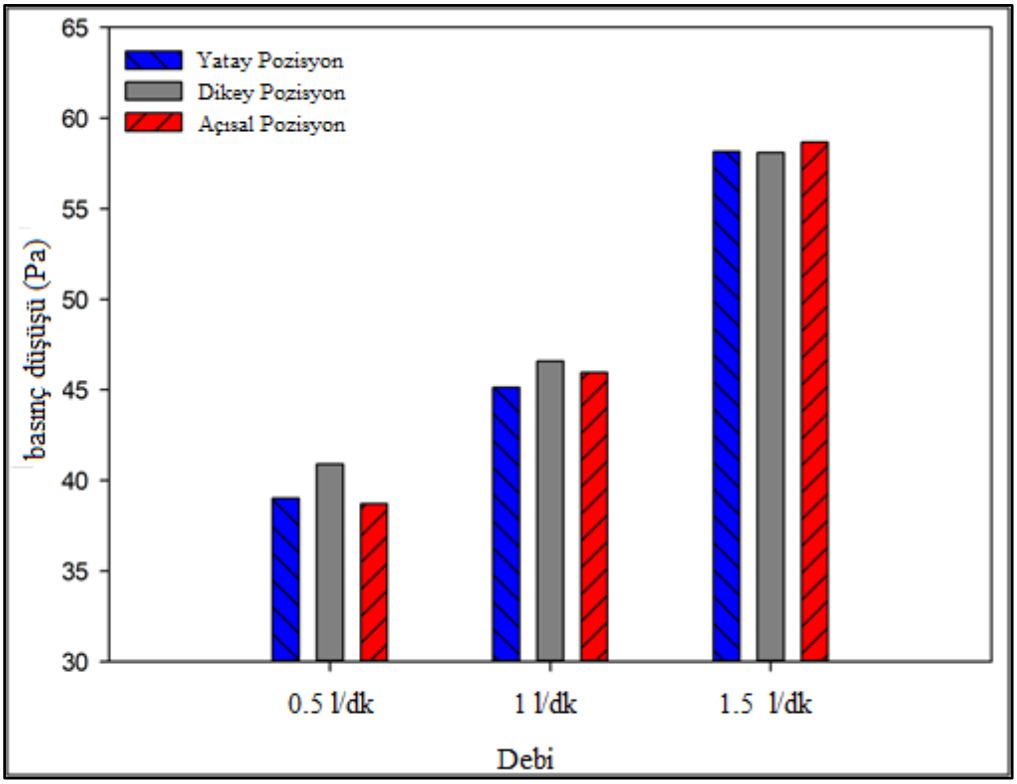


(a) **(b)**

(c)

Şekil 5.3. Kollektörün sarmal üzerindeki güneş ısısı akısı (a)) θ=0 (b) θ=40 (c) θ=90

Şekil 5.4, farklı kütle akış hızlarında ve eğim açılarında basınç düşüşü değerlerini göstermektedir. Ayrıca kollektör, güneş ışınlama vektörüne göre farklı açısal konuma sahiptir. Su kütle akış hızının arttırılmasıyla borudaki basınç düşüşü artmıştır. Bu, suyu sirkülasyona sokmak için daha fazla pompalama gücüne ihtiyaç duyulduğu anlamına gelir.



Şekil 5.4. Sayısal olarak elde edilen basınç düşüşü değerleri

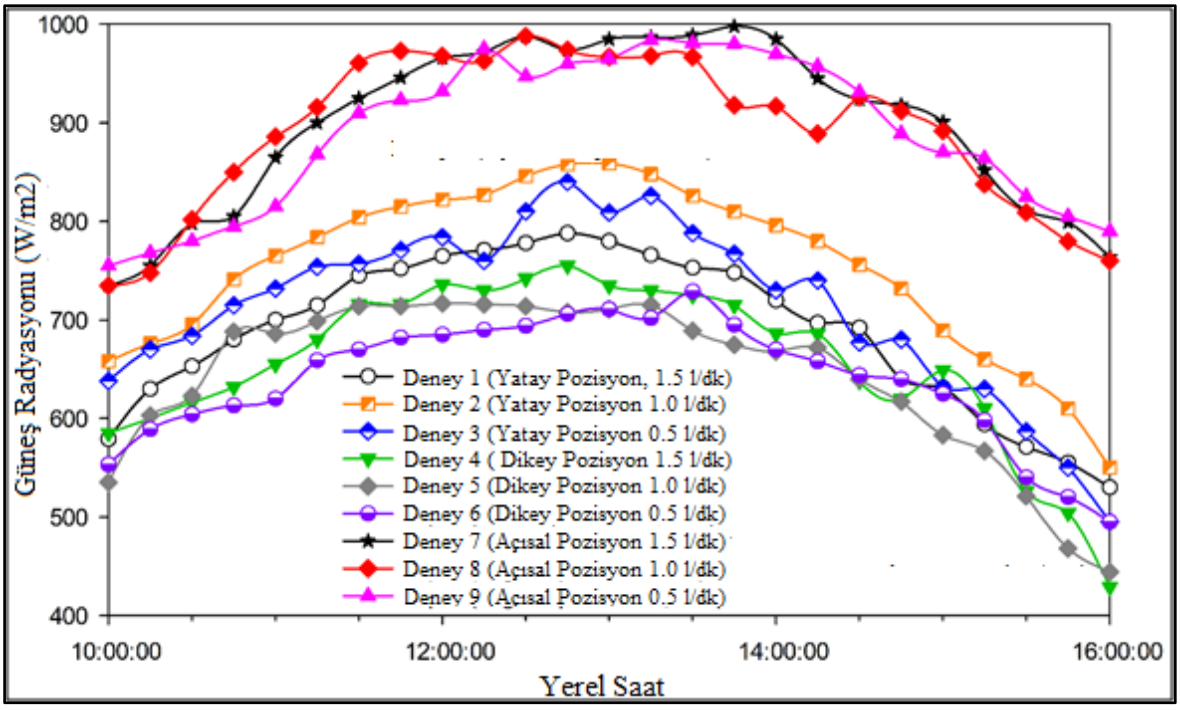
5.2. Deneysel Veriler

Deneysel olarak elde edilen ve kayıt altına alınan sonuçlar ayrıntılı olarak sunulmuş ve tartışılmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi, deneysel çalışma çeşitli debilerde ve açısal yerleştirmelerde 9 günde gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.5, güneş radyasyonu değerlerinin yerel zamana göre değişimini göstermektedir. Helisel sargılı toplayıcının yatay, dikey ve açısal yönlendirmeli deneylerinde ortalama güneş ışınımı değerleri 689-753 W/m^2, 639-656 W/m^2 ve 889-899 W/m^2 aralığında elde edilmiştir. Maksimum ve minimum ortalama güneş ışınımı değerleri deney 7 ve deney 6. Ayrıca en yüksek anlık güneş ışınımı 998 W/m2 olarak kaydedilmiştir. Kaydedilen güneş radyasyonunu önemli ölçüde etkileyen farklı yönlerde helisel olarak sarılmış toplayıcıyı test etmenin daha iyi olduğunu belirtmek daha iyidir. Yukarıda belirtildiği gibi, deneyler Eylül ve Ekim 2021'de yapılmıştır. Şekil 5.6, çevresel sıcaklık değerlerinin zamana bağlı değişimini göstermektedir. deney cinsinden ortalama çevre sıcaklığı. 1. deney. 2 ve 3. deney, sırasıyla 24.09°C, 24.44°C ve 24.19°C olarak elde edildi. Ayrıca, ortalama ortam sıcaklığı. 4. deney 5 ve 6. deney. sırasıyla 22.86°C, 23.60°C ve 22.93°C olarak elde edilmiştir. Ayrıca güneş kollektörünün açısal yönelimi ile yapılan deneylerde (Deney 7, Deney 8 ve Deney 9) ortalama çevre

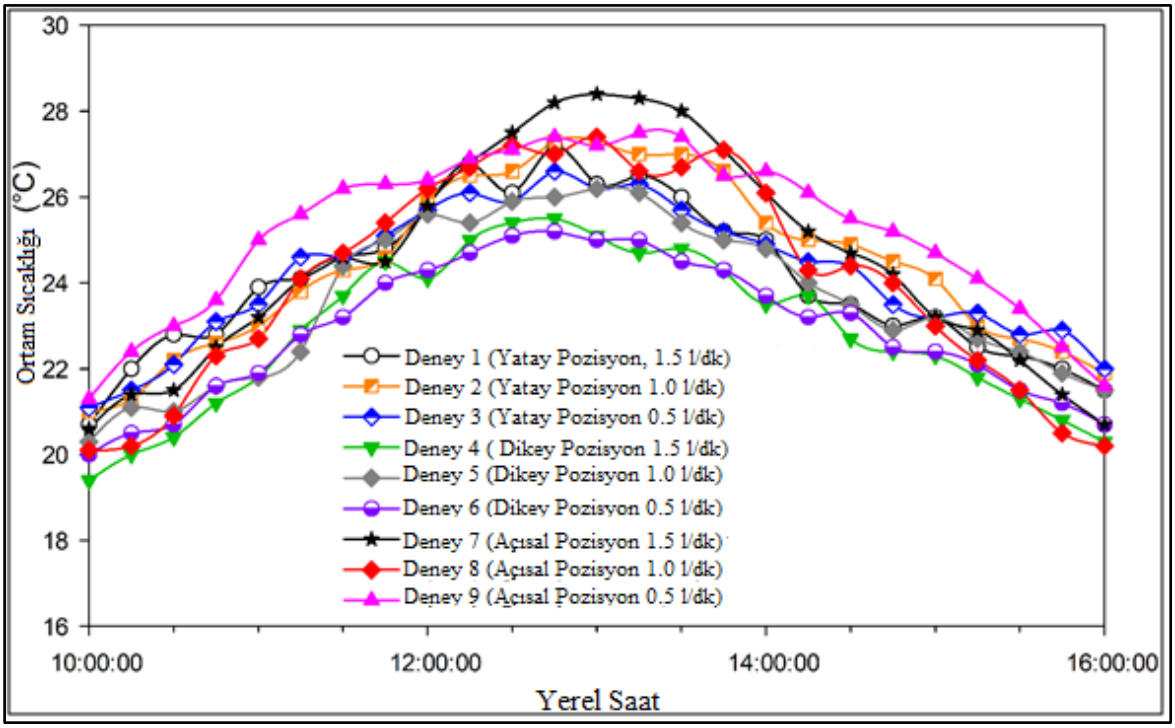
sıcaklığı değerleri sırasıyla 24,52 °C, 24,06 °C ve 25,18 °C olarak elde edilmiştir. Görüldüğü gibi elde edilen sıcaklık değerleri birbirine çok yakındır.

Kollektör giriş suyu şebeke suyundan sağlanmıştır. Bu nedenle giriş suyu sıcaklık değerleri deneyler sırasında değişim göstermiştir. Şekil 5.7, giriş suyu sıcaklık değerlerinin zamana bağlı değişimini göstermektedir.

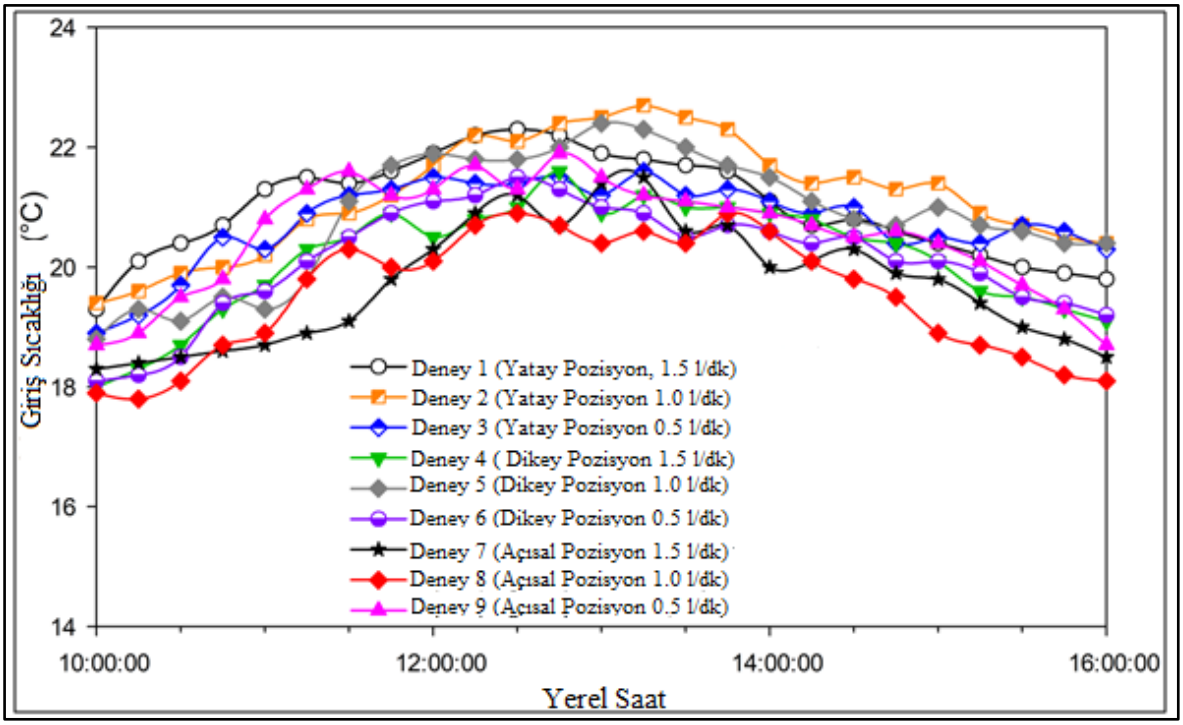
Helisel sargılı kollektörün yatay, dikey ve açısal yönlendirmeli deneylerinde giriş suyu sıcaklık değerleri sırasıyla 20.76-21.01°C, 20.13-20.87°C ve 19.54-20.55°C aralığında elde edilmiştir.



Şekil 5.5. Ölçülen solar radyasyon değerlerinde zamana bağlı değişim



Şekil 5.6. Ortam sıcaklık değerlerinde zamana bağlı değişim

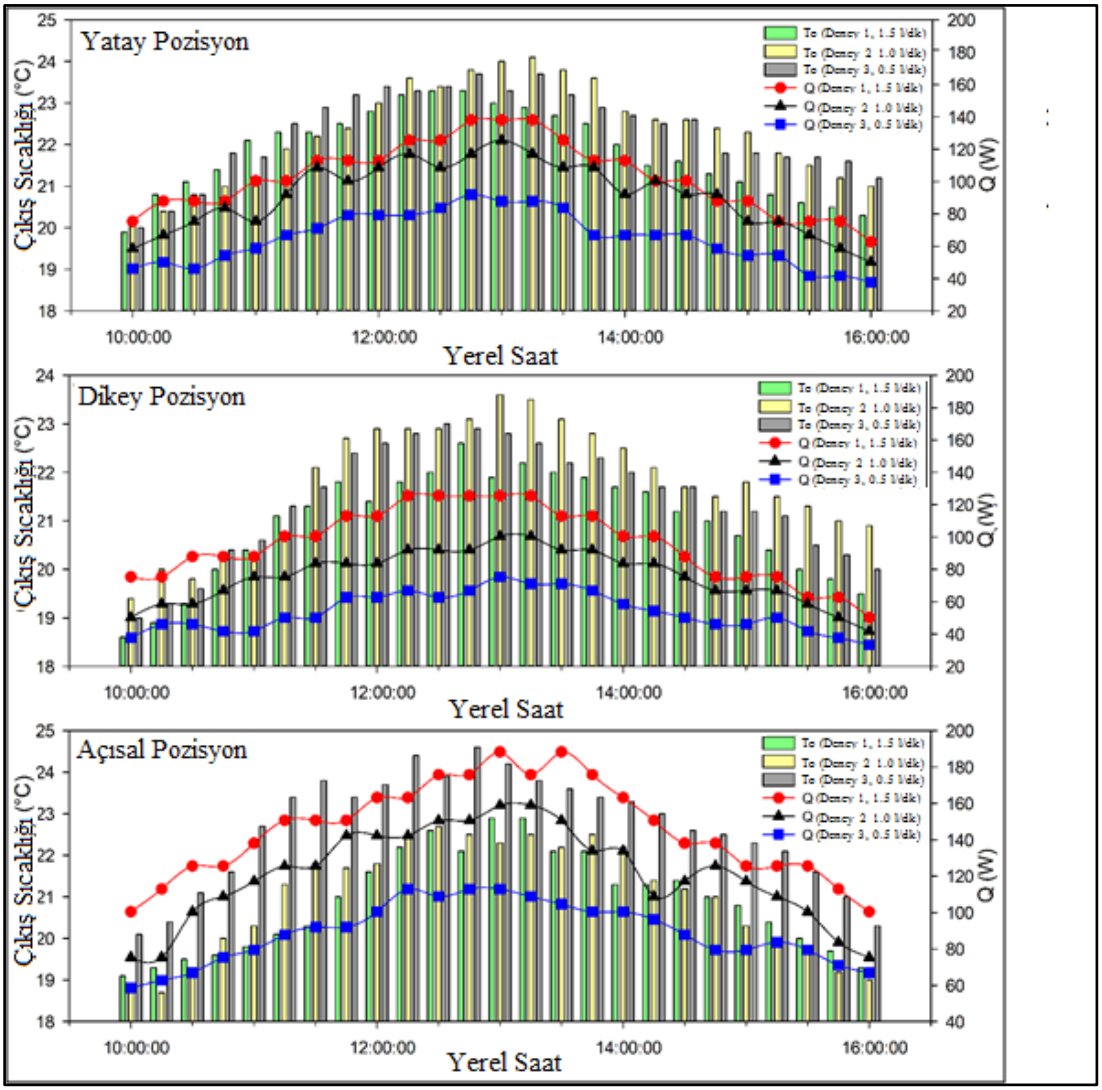


Şekil 5.7. Giriş suyu sıcaklıklarında zamana bağlı değişim

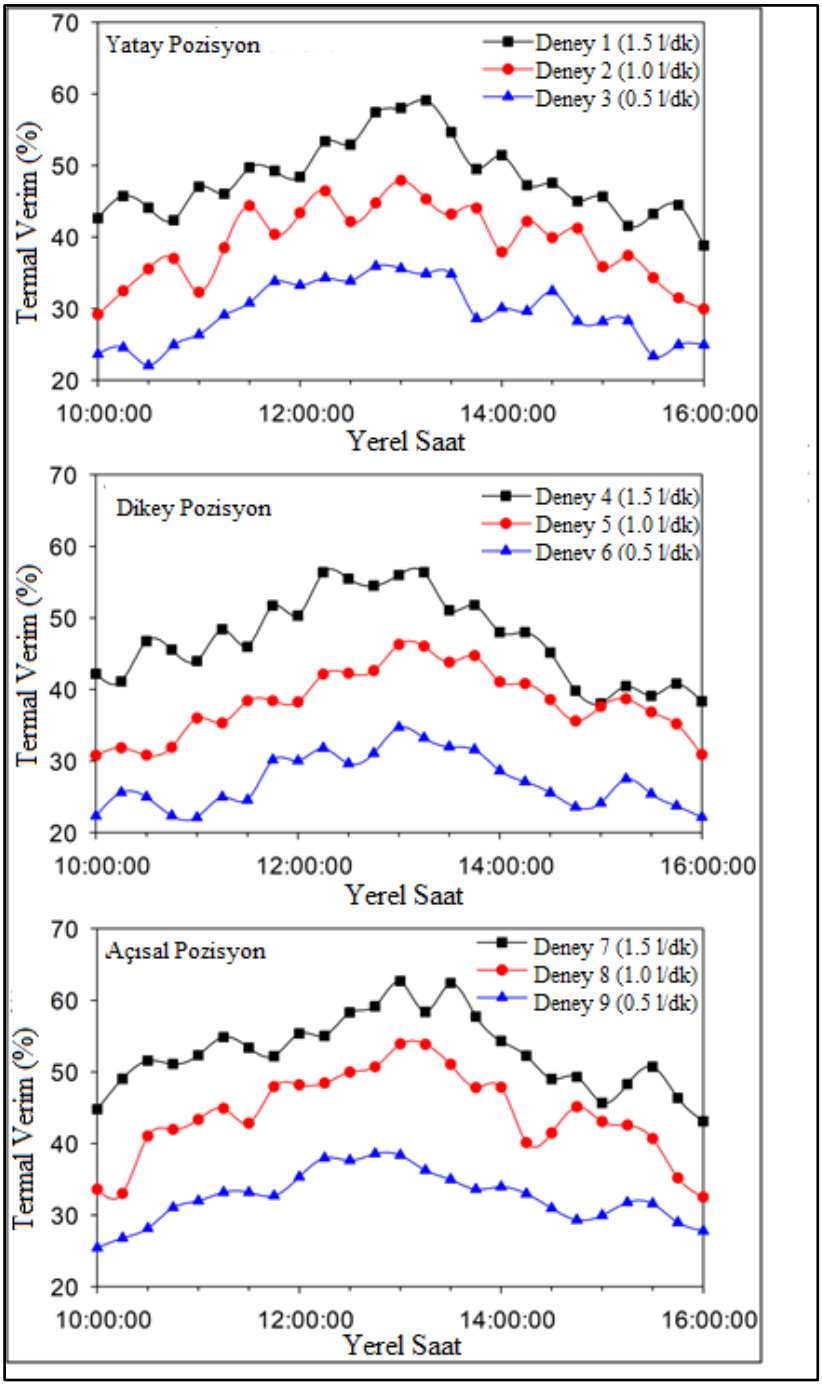
Şekil 5.8, çıkış suyu sıcaklıklarındaki zamana bağlı değişimi ve sarmal sargılı güneş kollektörünün farklı yönlerinde kazanılan ısıyı göstermektedir. Güneş kollektörünün yatay yerleşiminde ortalama çıkış sıcaklıkları 1,5, 1,0 ve 0,5 l/dk'da sırasıyla 21,83°C, 22,29°C

ve 22,31°C olarak kaydedilmiştir. Sarmal sargılı güneş kollektörünün düşey oryantasyondaki ortalama çıkış sıcaklık değerleri, 1.5, 1.0 ve 0.5 lt/dk debilerde sırasıyla 20.92°C, 21.77°C ve 21.40°C olarak elde edilmiştir. Ayrıca helisel sargılı güneş kollektörünün açısal yerleşimi için 1,5, 1,0 ve 0,5 l/dk su debilerinde ortalama çıkış sıcaklık değerleri 20,90°C, 20,99°C ve 22,67°C olarak elde edilmiştir. En düşük kütlesel debide yapılan deneylerde açısal yönlerde (Deney 7) çıkış sıcaklık değerleri diğer yerleşimlere göre yüksek çıkmıştır. Ayrıca yatay, dikey ve açısal yönlerde güneş kollektörü çıkışı ve girişi arasındaki sıcaklık değişiminin ortalama değeri sırasıyla 0.82-1.55°C, 0.76-1.28°C ve 1.16-2.12°C aralığında elde edilmiştir. Ayrıca yatay, dikey ve açısal yönlerde kazanılan ortalama yararlı enerji değerleri sırasıyla 64.96-102.45 W, 53.56-95.41 W ve 88.89-145.6 W aralığında elde edilmiştir.

Şekil 5.9, sarmal sargılı güneş enerjili su kollektörünün farklı yönelimleri için termal verimlilik değerlerindeki zamana bağlı değişimi göstermektedir. Deneyler için ortalama ısıl verim değerleri. 1. deney. 2 ve 3. deneyler sırasıyla %48.23, %41.94 ve %29.48 olarak elde edilmiştir. Ayrıca deneysel için ortalama etkinlik değerleri. 4.deney, 5 ve 6 deneyler sırasıyla %47,03, %38,21 ve %27,17 olarak elde edilmiştir. Ayrıca açısal yönelimler için ortalama ısıl verim değerleri (Deney 7, Deney 8 ve Deney 9) sırasıyla %52,71, %44,06 ve %32,50 olarak elde edilmiştir.

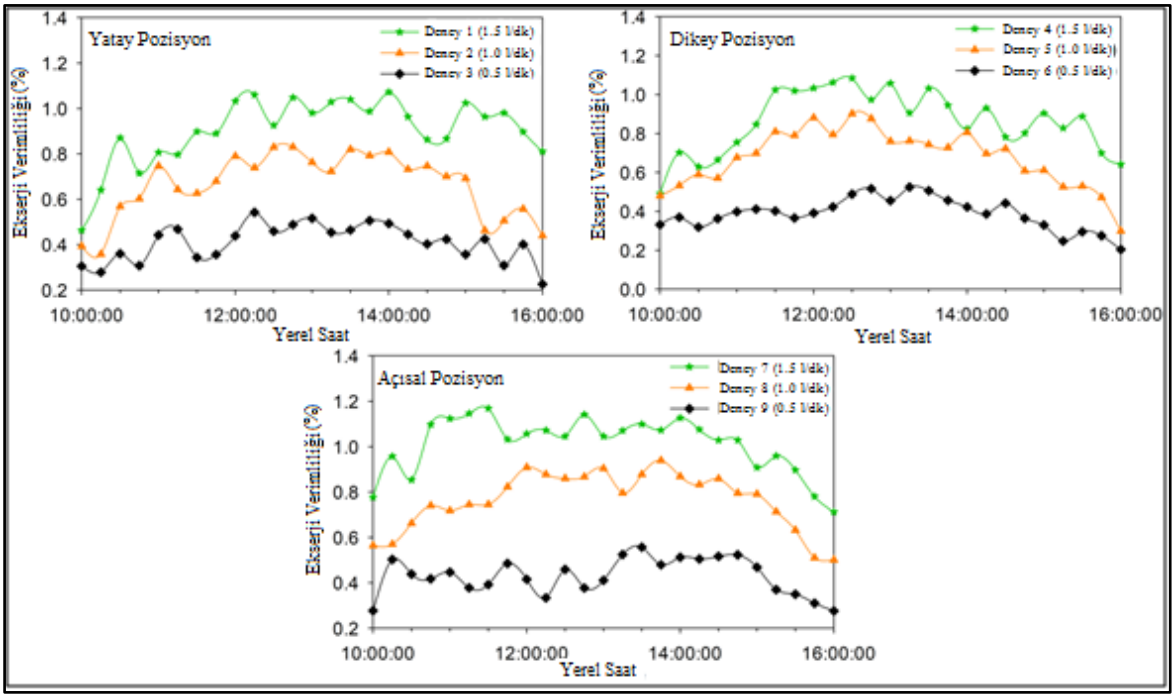


Şekil 5.8. Çıkış suyu sıcaklıklarında ve kazanılan ısıda zamana bağlı değişim



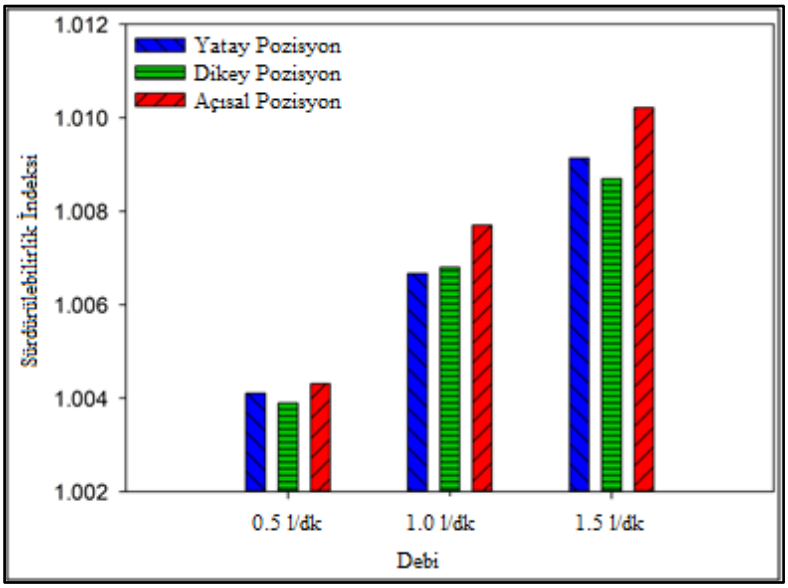
Şekil 5.9. Isıl verim değerlerinde zamana bağlı değişim

Şekil 5.10, sarmal sargılı güneş enerjili su kollektörünün çeşitli yönelimleri için ekserji verimliliği değerlerinde zamana bağlı değişimi göstermektedir. Genel olarak ekserji verim değerleri ile ısıl verim değerlerinin benzer eğilimler gösterdiği söylenebilir. Ancak, ortam sıcaklığı gibi çevresel koşulların değişimi bazı farklılıklara yol açmıştır. Helisel sargılı güneş kollektörünün yatay, dikey ve açısal yönelimi için ortalama ekserji verim değerleri sırasıyla %0.40-0.90, %0.38-0.86 ve %0.43-1.01 aralığında elde edilmiştir.



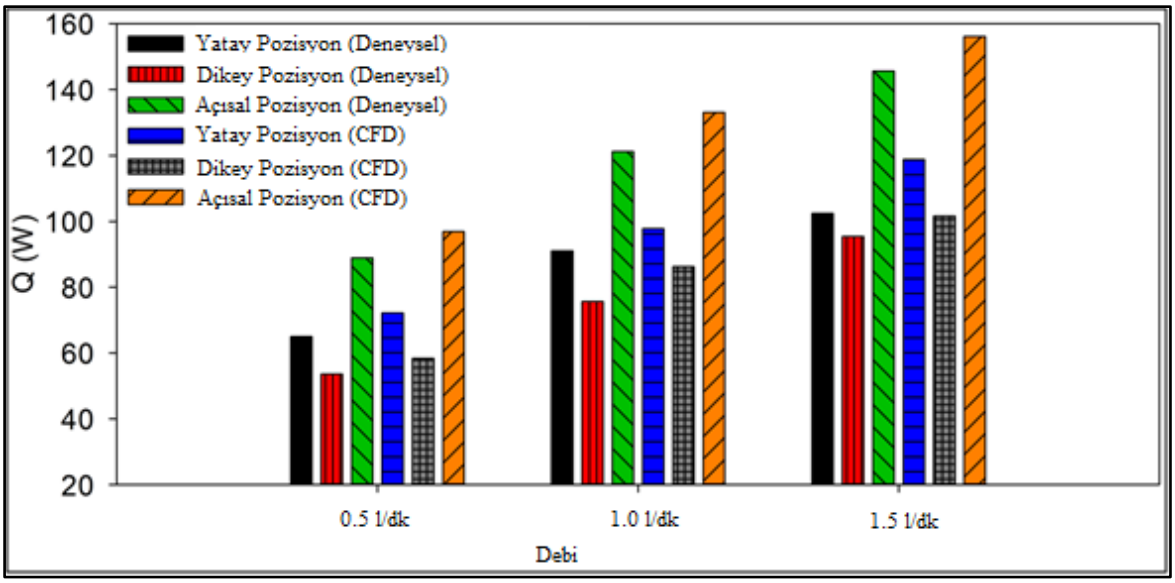
Şekil 5.10. Zamana bağlı değişim ekserji verimliliği değerleri

Şekil 5.11, farklı yönlerde sarmal sargılı güneş kollektörünün farklı yönler için deneysel olarak elde edilen ortalama SI değerlerini göstermektedir.SI değerleri Yatay pozisyonda 1.0041-1.0091, dikey pozisyonda 1.0039-1.008 ve açısal pozisyonda 1.0043-1.0102 aralığında elde edilmiştir [41].



Şekil 5.11. Deneysel olarak elde edilen ortalama SI değerleri

Şekil 5.12, farklı su akış hızlarında deneysel ve sayısal olarak elde edilen kazanılmış termal enerji değerlerinin bir karşılaştırmasını göstermektedir. Kollektör açısal konumunu artırarak (kolektör konumunu yataydan dikey duruma değiştirerek), kollektör tarafından emilen güneş enerjisi azalır. Elde edilen bulgulara göre deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki sapma %6,5-16 aralığında elde edilmiştir.



Şekil 5.12. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen kazanılmış ısıl enerji değerlerinin karşılaştırılması

Çizelge 5.1'de bu çalışmada tasarlanan kollektörün, benzer su dolaşımlı güneş kollektörleri ile karşılaştırılması sunulmuştur.

Çizelge 5.1. Elde edilen ısıl verim değerlerinin literatürde bulunan benzer çalışmalarla karşılaştırılması

Kaynak	Kollektör Tipi	Bölge	Debi	Termal Verim
Goudarzi vd (2014).[17]	Helisel – Sarmal Kollektör	Yasouj, Iran	0.0083, 0.0167 and 0.033 kg/s	~10-70%
Goudarzi vd. (2015)[44]	Helisel – Sarmal Kollektör	Iran	0.0083 kg/s	~0.05-75%
Bizim Çalışmamız	Helisel – Sarmal Kollektör	Ankara, Turkey	0.5-1.5 l/dk	27.17-52.71%

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, sarmal olarak sarılmış helisel tip bir güneş kollektörü tasarlanarak, deney seti hazırlanmıştır. Hazırlanan kollektör sistemi üzerinde değişkenler belirlenerek deneyler yapılmıştır. Ayrıca sarmal sargılı toplayıcının akış ve ısıl davranışını belirlemek için CFD yöntemi kullanılmıştır. Bu bağlamda, tasarlanan sarmal sargılı toplayıcı farklı yönlenme açılarında sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Mevcut çalışmanın ana sonuçları şu şekilde verilebilir:

- Yatay, dikey ve açısal yönlerde kazanılan ortalama yararlı enerji değerleri sırasıyla 64,96-102,45 W, 53,56-95,41 W ve 88,89-145,6 W aralığında elde edilmiştir.

- Yatay, dikey ve köşeli sarmal kollektörün ısıl verim değerleri sırasıyla %29,48-48,23, %27,17-47,03 ve %32,50-52,71 aralığında elde edilmiştir.

- Yatay, dikey ve açısal sarmal kollektör için sürdürülebilirlik indeks değerleri sırasıyla 1.0041-1.0091, 1.0039-1.0087 ve 1.0043-1.0102 aralığında elde edilmiştir.

Bu deneyler ve sayısal sonuçlar, sarmal sargılı kollektörün iyi bir güneş soğurucusu olarak uygulanabilirliğini elde etti. Kollektör yapısının sarmal olması, güneş ışınlarının her zaman dik şekilde kollektör yüzeyine gelmesini sağladı. Kollektör yüzeyinde kullanılan endüstriyel mat boya soğuruculu arttırdı. Kollektör tabanında kullanılan reflektör güneş ışınlarının yüzeyden yansıyarak kollektör yüzeyine gelmesini sağladı. Kollektör muhafazasının cam ile çevrilmesi dış etkenlerden kollektör yüzeyini korumakla kalmayıp sera etkisi sağladı.Sarmal kollektörün açısının değiştirilmesinin güneş ışınlarının daha fazla yüzeye dik olarak gelmesini sağlayarak aslında kollektör duruş açısının bize önemini göstermiş oldu. Sonraki çalışmalarda daha fazla ısıl performans elde etmek için farklı modifikasyonlar yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Selimefendigil, F., Şirin, C. (2022). Energy and exergy analysis of a hybrid photovoltaic/thermal-air collector modified with nano-enhanced latent heat thermal energy storage unit. *Journal of Energy St orage*, 45, 103467.

2. Akbar, A., Najafi, G., Gorjian, S., Kasaeian, A., Mazlan, M. (2021). Performance enhancement of a hybrid photovoltaic-thermal-thermoelectric (PVT-TE) module using nanofluid-based cooling: Indoor experimental tests and multi-objective optimization, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 46, 101276.

3. Gorjian, S., Hosseingholilou, B., Jathar, L.D., Samadi, H., Samanta, S., Sagade, A.A., Kant, K. Sathyamurthy, R. (2021). *Recent Advancements in Technical Design and Thermal Performance Enhancement of Solar Greenhouse Dryers. Sustainability* 13, 7025.

4. Selimefendigil, F., Şirin, C., Öztop, H. F. (2022). Experimental performance analysis of a solar desalination system modified with natural dolomite powder integrated latent heat thermal storage unit. *Sustainability*, 14, 2650.

5. Awasthi, K., Khan, M. K. (2019). Performance evaluation of coiled tube receiver cavityfor a concentrating collector. *Renewable Energy*, 138, 666-674.

6. Ghodbane, M., Bellos, E., Said, Z., Boumeddane, B., Hussein, A. K., Kolsi, L. (2021). Evaluating energy efficiency and economic effect of heat transfer in copper tube for small solar linear Fresnel reflector. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 143(6), 4197-4215.

7. Sheikholeslami, M., Farshad, S. A. (2021). Investigation of solar collector system with turbulator considering hybrid nanoparticles. *Renewable Energy*, 171, 1128-1158.7

8. Li, G. (2015). Energy and exergy performance assessments for latent heat thermal energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 926-954.

9. Li, G. (2016). Sensible heat thermal storage energy and exergy performance evaluations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 897-923.

10. Li, G., Zheng, X. (2016). Thermal energy storage system integration forms for a sustainable future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 736-757.

11. Xiong, Q., Altnji, S., Tayebi, T., Izadi, M., Hajjar, A., Sundén, B., Li, L. K. (2021). A comprehensive review on the application of hybrid nanofluids in solar energy collectors. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101341.

12. Almeshaal, M., Arunprasad, V., Palaniappan, M., Kolsi, L. (2020). Experimental study of a solar water heater fitted with spacer at the leading edge of Left-Right screw tapes. *Case Studies in Thermal Engineering*, 22, 100777.

13. Gholipour, S., Afrand, M., Kalbasi, R. (2020). Improving the efficiency of vacuum tube collectors using new absorbent tubes arrangement: introducing helical coil and spiral tube adsorbent tubes. *Renewable Energy*, 151, 772-781.

14. Gholipour, S., Afrand, M., Kalbasi, R. (2021). Introducing two scenarios to enhance the vacuum U-tube solar collector efficiency by considering economic criterion. Journal of the *Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 124, 228-237.

15. Abo-Elfadl, S., Hassan, H., El-Dosoky, M.F., (2020). Study of the performance of double pass solar air heater of a new designed absorber: An experimental work. *Solar Energy* 198, 479-489.

16. Afshari, F., Sözen, A., Khanlari, A., Tuncer, A.D., Şirin, C. (2020). Effect of turbulator modifications on the thermal performance of cost-effective alternative solar air heater. *Renewable Energy* 158, 297-310.

17. Afshari, F., Tuncer, A. D., Sözen, A., Çiftçi, E., Khanlari, A. (2021). Experimental and numerical analysis of a compact indirect solar dehumidification system. *Solar Energy*, 226, 72-84.

18. Goudarzi, K., Shojaeizadeh, E., Nejati, F. (2014). An experimental investigation on the simultaneous effect of CuO–H_2O nanofluid and receiver helical pipe on the thermal efficiency of a cylindrical solar collector. *Applied Thermal Engineering*, 73(1), 1236-1243.

19. Goudarzi, K., Nejati, F., Shojaeizadeh, E., Yousef-Abad, S. A. (2015). Experimental study on the effect of pH variation of nanofluids on the thermal efficiency of a solar collector with helical tube. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 60, 20-27.

20. Shojaeizadeh, E., Veysi, F., Habibi, H., Goodarzi, K., Habibi, M. (2021). Thermal efficiency investigation of a ferrofluid-based cylindrical solar collector with a helical pipe receiver under the effect of magnetic field. *Renewable Energy*, 176, 198-213.

21. Chakraborty, O., Roy, S., Das, B., Gupta, R. (2021). Effects of helical absorber tube on the energy and exergy analysis of parabolic solar trough collector–A computational analysis. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 44, 101083.

22. Swanepoel, J. K., le Roux, W. G., Lexmond, A. S., Meyer, J. P. (2021). Helically coiled solar cavity receiver for micro-scale direct steam generation. *Applied Thermal Engineering*, 185, 116427.

23. Raut, D., Lanjewar, S., Kalamkar, V. R. (2022). Effect of geometrical and operational parameters on paraffin's melting performance in helical coiled latent heat storage for solar application: A numerical study. *International Journal of Thermal Sciences*, 176, 107509.

24. Lewis, R. W., Malan, A. G., 2005. Continuum thermodynamic modeling of drying capillary particulate materials via an edge-based algorithm. *Computer methods in applied mechanic sandengineering*, *194*,2043-2057. https://doi.org/10.1615/ICHMT.2004.IntThermSciSemin.180.

25. Malan, A. G., Lewis, R. W., (2003). Continuum thermodynamic modeling of drying capillary particulate materials using an unstructured finite volume algorithm. *In Computational Fluid and Solid Mechanics*, 1434-1437. https://doi.org/10.1016/B978-008044046-0/50351-1.

26. Singla, M., Hans, V. S., Singh, S. (2022). CFD analysis of rib roughened solar evacuated tube collector for air heating. *Renewable Energy,* 183, 78-89.

27. Sheikholeslami, M., Farshad, S. A., Shafee, A., Babazadeh, H. (2021). Performance of solar collector with turbulator involving nanomaterial turbulent regime. *Renewable Energy,* 163, 1222-1237.

28. Sheikholeslami, M., Jafaryar, M., Said, Z., Alsabery, A. I., Babazadeh, H., Shafee, A. (2021). Modification for helical turbulator to augment heat transfer behavior of nanomaterial via numerical approach. *Applied Thermal Engineering,* 182, 115935.

29. Saedodin, S., Zaboli, M., Ajarostaghi, S. S. M. (2021). Hydrothermal analysis of heat transfer and thermal performance characteristics in a parabolic trough solar collector with Turbulence-Inducing elements. *Sustainable Energy Technologies and Assessments,* 46, 101266.

30. Xiong, Q., Tayebi, T., Izadi, M., Siddiqui, A. A., Ambreen, T., Li, L. K. (2021). Numerical analysis of porous flat plate solar collector under thermal radiation and hybrid nanoparticles using two-phase model. *Sustainable Energy Technologies and Assessments,* 47, 101404.

31. Wong, K.F.V., 2000. *Thermodynamics for Engineers.* University of Miami/CRC Press LLC, Taylor & Francis, USA.

32. Çengel, Y., Cimbala, J. (2013). *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications, 3rd Edition, McGraw-Hill Education,* New York**,** NY.

33. Nithiarasu, P., Lewis, R. W., Seetharamu, K. N. (2016). *Fundamentals of The Finite Element Method For Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons.

34. Khanlari, A., Tuncer, A. D., Sözen, A., Aytaç, İ., Çiftçi, E., Variyenli, H. İ. (2022). Energy and exergy analysis of a vertical solar air heater with nano-enhanced absorber coating and perforated baffles. *Renewable Energy,* 187, 586-602.

35. Ansys, (2017) *ANSYS Fluent Theory Guide,* ANSYS Inc, Canonsburg.

36. Çengel, Y., Ghajar, A., (2020). *Heat and Mass Transfer-Fundamentals and Applications, 6th Edition, McGraw-Hill Education, New York,* NY.

37. Fattahi, A., Karimi, N. (2022). Numerical simulation of the effects of superhyd rophobic coating in an oval cross-sectional solar collector with a wavy absorber filled with water-based Al2O3-ZnO-Fe3O4 ternary hybrid nanofluid. *Sustainable Energy Technologies and Assessments,* 50, 101881.

38. Kotas, T.J., (1995). *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*. Krieger Publish Company, UK, Malabar, FL.

39. Yazdanpanahi, J., Sarhaddi, F., Adeli, M. M. (2015). Experimental investigation of exergy efficiency of a solar photovoltaic thermal (PVT) water collector based on exergy losses. *Solar Energy*, 118, 197-208.

40. Petela, R., 2003. Exergy of undiluted thermal radiation. *Solar Energy 74*, 469-488.

41. Sözen, A., Sirin, C., Khanlari, A., Tuncer, A.D., Gürbüz, E.Y., (2020). Thermal performance enhancement of tube-type alternative indirect solar dryer with iron mesh modification. *Solar Energy 207*, 1269-1281.

42. Çalışkan, H. (2017). Energy, exergy, environmental, enviroeconomic exergo environmental (EXEN) and exergoenviroeconomic (EXENEC) analyses of solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 488-492.

43. Tiwari, A., Dubey, S., Sandhu, G.S., Sodha, M.S., Anwar, S.I., 2009. Exergy analysis of integrated photovoltaic thermal solar water heater under constant flow rate and constant collection temperature modes. *Applied Energy* 86 (12), 2592–2597.



Gazili olmak ayrıcalıktır